



① BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

② Offenlegungsschrift
③ DE 43 33 419 A 1

⑤ Int. Cl.⁵:
G 01 B 7/10
G 01 D 3/04
G 01 K 13/00
G 01 D 5/20

②① Aktenzeichen: P 43 33 419.9
②② Anmeldetag: 30. 9. 93
②③ Offenlegungstag: 14. 4. 94

DE 43 33 419 A 1

③① Unionspriorität: ③② ③③ ③④
05.10.92 US 956280

⑦① Anmelder:
DeFelsko Corp., Ogdensburg, N.Y., US

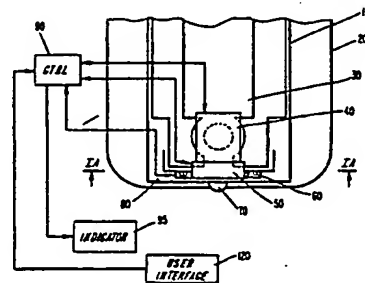
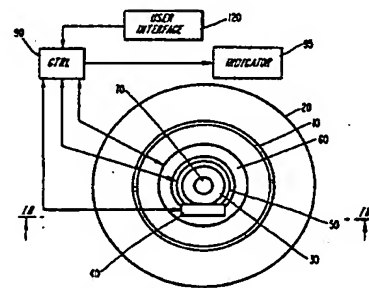
⑦④ Vertreter:
von Samson-Himmelstjerna, F., Dipl.-Phys.; Turi, M.,
Dipl.-Phys., Pat.-Anwälte, 80538 München

⑦② Erfinder:
Koch, Frank J., Ogdensburg, N.Y., US; Vandervalk,
Leon C., Ogdensburg, N.Y., US; Beamish, David J.,
Ogdensburg, N.Y., US

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Verfahren und Vorrichtung zur Schichtdickenmessung

⑤⑦ Eine Schichtdickenmeßvorrichtung bzw. eine Meßsonde für eine Schichtdickenmeßvorrichtung sowie ein Verfahren zur Schichtdickenmessung ermöglicht die Messung sowohl von eisenfreien Schichten auf eisenhaltigen Substraten, als auch von nicht-leitenden Schichten auf leitenden Substraten. Dabei ist die Schichtdickenmeßvorrichtung bzw. die Meßsonde derart ausgelegt, daß die Substrateigenschaften mit einer einzigen Sonde automatisch bestimmt und eine Schichtdickenmessung auf dem charakterisierten Substrat durchgeführt wird. Für die Messung von Schichtdicken auf einem eisenhaltigen Substrat verwendet die Erfindung einen Permanentmagneten (30), sowie einen Hall-Sensor (50) und einen Thermistor (40), die angeordnet sind, um eine temperaturkorrigierte magnetische Flußdichte an einem Pol des Permanentmagneten (30) zu bestimmen, wobei diese Flußdichte mit der Schichtdicke in Bezug gebracht werden. Für die Messung von nicht-leitenden Schichten auf einem leitenden Substrat nutzt die Erfindung Wirbelstromeffekte aus. Eine Spule induziert Wirbelströme an der Oberfläche des leitenden Substrats. Die resultierenden Wirbelströme erzeugen umgekehrt ein entgegengesetzt gerichtetes Magnetfeld, das wiederum einen Einfluß auf die angeregte Spule hat, wobei diese Wirbelstromeffekte in einen Bezug gebracht werden mit der Schichtdicke (Fig. 1).



DE 43 33 419 A 1

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Meßvorrichtung zur Schichtdickenbestimmung von Schichten auf Substraten sowie auf eine Meßsonde zur Schichtdickenmessung, insbesondere für eine kombinierte Schichtdickenmeßvorrichtung zur Bestimmung der Schichtdicke von einer eisenfreien Schicht auf einem eisenhaltigen, insbesondere eisendotierten Substrat und von einer nicht-leitenden Schicht auf einem leitenden eisenfreien Substrat.

In der Vergangenheit waren Betreiber von Schichtdickenmeßvorrichtungen in der Regel gezwungen, den Substrattyp zu bestimmen, bevor die eigentliche Messung der Dicke einer Schicht auf diesem Substrat durchgeführt wurde. In Kenntnis des Substrattyps hat dann der Betreiber eine geeignete Sondenkonfiguration ausgewählt und sodann die entsprechende Dickenmessung durchgeführt. In der Regel benötigt der Bediener dabei zwei getrennte unabhängige Meßsysteme bzw. zwei unabhängige Sonden, die zu einer einzigen Meßvorrichtung kombiniert sein können. Zusätzlich dazu hat der Bediener die Eigenschaften der Probe (Kombination aus Schicht und Substrat) zu bestimmen, bevor die eigentliche Schichtdickenmessung auf dem derartigen charakterisierten Substrat durchgeführt wird.

Daher besteht seit langem ein Bedürfnis nach einer Vorrichtung, die in der Lage ist, Substrateigenschaften und Messungen der Schichtdicke auf dem Substrat automatisch durchzuführen. Eine derartige Vorrichtung würde dem Bediener erlauben, die einzelne Meßsondenspitze der Vorrichtung auf der Probe zu plazieren und mit geeigneten Meßinstrumenten, die mit der Meßsonde verbunden sind, den Substrattyp festzustellen und automatisch die Schichtdicke zu messen.

Nach dem Stand der Technik sind bereits mehrere elektromagnetische Dickenmeßvorrichtungen bekannt, die mehrere Zwecke erfüllen. Zum Beispiel beschreibt das US-Patent Nr. 3,986,105 von NIX et al. eine Meßsonde, die zwei Spulen verwendet, welche um einen verlängerten ferromagnetischen Kern gewunden sind. Eine Spule dient dabei dem Transport eines Anregungsstromes und die andere Spule der Durchführung von Messungen. Durch Veränderung der Anregungsfrequenz ist es möglich, die Auswirkung sowohl auf eisenhaltige, als auch auf eisenfreie leitende Substrate an der Meßspule zu beobachten. Dabei ermöglicht ein niederfrequenter Anregungsstrom (unter 300 Hz) die Messung der Schichtdicke einer eisenfreien Schicht auf einem eisenhaltigen Substrat, während hochfrequente Anregungsströme (oberhalb 1000 Hz) die Messung von Schichtdicken einer nicht leitenden Schicht auf einem eisenfreien leitenden Substrat ermöglicht, wobei Wirbelstromeffekte an der Meßspule ausgenutzt werden. Die elektromagnetische Dickenmeßvorrichtung von NIX et al. verwendet aber weder ein konstantes Magnetfeld eines Permanentmagneten zusammen mit einem Hall-Effekt-Magnetsensor, um eine Schichtdicke zu messen, noch irgendwelche Mittel für die Kompensation bzw. Korrektur der gemessenen magnetischen Flußdichte bei Änderungen in der Temperatur, aber auch keine Wirbelstrommeßspule, die auf eine ausreichend hohe Frequenz angeregt wird, um die Eindringtiefe der Wirbelströme in das leitende Substrat zu verringern, so daß diese bekannte Meßvorrichtung keine Messung liefert, die Substratdickenvariationen ausreichend berücksichtigt. Außerdem werden bei der elektromagnetischen Dickenmeßvorrichtung von NIX et al. die Meßbetriebszustände der Dickenmessung (geringe oder hohe Frequenz der Anregungsspule) in Abhängigkeit der magnetischen Eigenschaft des Substrats aufwendig per Hand und nicht automatisch geschaltet.

Das US-Patent Nr. 4,005,359 von SMOOT beschreibt eine elektronische Dickenmeßvorrichtung zur Messung von Schichtdicken auf eisenhaltigen oder leitenden eisenfreien Substraten, indem die Bewegung eines niederfrequenten Buckels bzw. Wellenberges in der Empfangskurve für einen überkoppelten, doppelt abgestimmten, an der Stirnseite offenen Transformator gemessen wird, wobei die eisenhaltigen und/oder leitenden eisenfreien Substrate quer zum Spalt zwischen den Transformator-Polflächen angeordnet werden. Dabei können sowohl Schichtdicke als auch magnetische Eigenschaft des Substrats in einem Vorgang ohne Mehrdeutigkeit im Ergebnis und ohne Veränderung bzw. Umbau der Vorrichtung bestimmt werden aufgrund der Fähigkeit des Geräts, seinen gesamten Frequenzempfang in Übereinstimmung mit Veränderungen in Selbst- und Wechselinduktivität zu variieren. Da die Schichtdickenmeßvorrichtung von SMOOT einen Transformator mit offener Stirnseite erfordert, um eine Schichtdicke auf eisenhaltigen und aufleitenden eisenfreien Substraten zu messen, und weiterhin erfordert, daß das beschichtete Substrat quer zum relativ großen Spalt zwischen den Transformatorpolflächen angeordnet wird, befindet sich die Vorrichtung von SMOOT notwendigerweise an wenigstens zwei Orten in Kontakt mit dem beschichteten Substrat, so daß die Kontaktfläche zwischen der Vorrichtung von SMOOT und dem beschichteten Substrat relativ groß ist. Da die Schichtdickenmeßvorrichtung von SMOOT weder einen Hall-Generator, noch eine Wirbelstromeffektmeßspule verwendet, um jede der vorgenannten Schichtdickenmessungen durchzuführen, kann die Vorrichtung von SMOOT nicht kompakt in einer einzigen Meßsonde untergebracht werden, welche die Schichtoberfläche an höchstens einem Ort mit möglichst kleiner Kontaktfläche kontaktiert.

Daher besteht das Bedürfnis nach einer Meßvorrichtung mit einer kompakten Schichtdickenmeßsonde, die eisenhaltige Substrate mit Hilfe eines Hall-Generators und eisenfreie Substrate mit Hilfe einer Wirbelstromuntersuchungsspule untersuchen, wobei automatisch von einem Meßbetriebsmodus in den anderen geschaltet wird, um eine Schichtdicke sowohl auf einem eisenhaltigen, als auch auf einem leitenden eisenfreien Substrat zu messen, und wobei die Meßsonde die Oberfläche des beschichteten Substrats an wenigstens einem Ort mit einer relativ kleinen Kontaktfläche kontaktiert.

Auch das US-Patent Nr. 4,255,709 von ZATSEPIN et al. beschreibt eine Vorrichtung zur Dickenbestimmung von aufgetragenen Schichten, die je nach der speziellen Anwendung einen unterschiedlichen Typ von Dickenmeßsonden benötigt, z. B. vom elektromagnetischen, vom Mikrowellen- oder vom Ultraschalltyp. Die Vorrichtung mißt die Dicke von dielektrischen Schichten, die auf metallischen Proben aufgetragen sind, und von nicht-magnetischen galvanischen Abtragungen bzw. Niederschlägen auf ferromagnetischen Proben. Die Vorrichtung mißt dann die Schichtdicke von nicht-magnetischen, stromleitenden Schichten auf nicht-magnetischen,

stromleitenden Materialien mit einer geeignet ausgewählten Dickenmeßsonde. Das Schichtdickenmeßsystem von ZATSEPIN et al. verwendet eine automatische Meßbereich-Schalteinheit, die wird zum automatischen Umschalten von einem Dickenmeßbereich in einen anderen eingesetzt wird, ohne Rücksicht auf die magnetische Eigenschaft des darunter liegenden Substrats. Denn bei ZATSEPIN et al. werden die Dickenmesser aufwendig per Hand und nicht automatisch in Abhängigkeit der magnetischen Eigenschaft des Substrats umgestellt bzw. umgeschaltet. Daher besteht das Bedürfnis nach einer kompakten Einzelmesssonde für eine kombinierte Schichtdickenmeßvorrichtung, die ein automatisches Umschalten von einem Meßbetriebsmodus der Schichtdickenmessung in einen anderen, — und zwar in Abhängigkeit der Eigenschaften des darunterliegenden Substrats, die vor allem automatisch bestimmt werden soll.

Eine weitere Vorrichtung zur Schichtdickenmessung offenbart das US-Patent Nr. 4,722,142 von SCHMIDT zur Dickenmessung von Schichten, die kaum leitend sind, z. B. Kunststoff, an der Innenwand eines metallischen, rohrförmigen Vorrichtungsteils und entlang der Länge dieses metallischen, rohrförmigen Teils. Vorzugsweise verwendet die Vorrichtung einen Nahwirkungsdetektor, basierend auf elektronischen Wirbelstromverlusten, um die Schichtdicke zu messen.

Das US-Patent 5,015,950 von ROSE et al. beschreibt eine Vorrichtung für die zerstörungsfreie Untersuchung von Sperr- bzw. Grenzschichten auf elektrisch leitenden Materialien, die eine kontrollierte bekannte Hitzeladung auf einem begrenzten Bereich der Schicht anlegt und die Veränderung in der elektrischen Leitfähigkeit des darunter liegenden Materials mit Hilfe einer Wirbelstromspule mißt. Die elektrische Leitfähigkeit des Materials wird beeinflusst durch Temperaturänderungen aufgrund der thermischen Leitung in das Material durch die darüber liegende Schicht, so daß die Dicke der Schicht, ihre thermische Leitfähigkeit und/oder ihre strukturellen Eigenschaften untersucht werden können, und zwar für jeden beliebigen Schichttyp.

Zwar verwenden die Schichtdickenmeßsysteme von SCHMIDT und ROSE et al. Wirbelstromdetektoren, um die Schichtdicken auf leitenden Substraten zu messen, aber weder SCHMIDT noch ROSE et al. verwenden einen Hall-Generator für die Messung von Schichtdicken auf eisenhaltigen Substraten, so daß weder SCHMIDT noch ROSE et al. ein automatisches oder manuelles Schalten der Detektoren bzw. Meßmodi je nach der magnetischen Eigenschaft des Substrats verwirklichen.

Daher besteht seit langem ein Bedürfnis nach einer Meßsonde für eine kombinierte Schichtdickenmeßvorrichtung zur Bestimmung der Schichtdicke von sowohl eisenfreien Schichten auf einem eisenhaltigen Substrat mit Hilfe eines Hall-Generators, als auch von nicht-leitenden Schichten auf einem leitenden, eisenfreien Substrat mit Hilfe einer Wirbelstrommeßspule, wobei eine derartige Vorrichtung ein automatisches Schalten von Betriebsmodi der Schichtdickenmessung in Abhängigkeit der physikalischen Eigenschaft des darunter liegenden Substrats ermöglicht, die automatisch bestimmt werden soll. Dabei sollte die Meßsonde die Oberfläche des beschichteten Substrats an höchstens einem Ort mit einer relativ kleinen Kontaktfläche berühren.

Die Erfindung zielt darauf ab, ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zur Messung von Schichtdicken auf Substraten zu schaffen, die eine besonders einfache und mit geringem Arbeitsaufwand verbundene Schichtdickenmessung gewährleistet, — insbesondere sowohl von eisenfreien Schichten auf eisenhaltigen Substraten, als auch von nicht-leitenden Schichten auf leitenden Substraten.

Dies wird erreicht durch eine Verfahren zur Schichtdickenmessung von eisenfreien bzw. nicht-magnetischen Schichten auf einem eisenhaltigen bzw. magnetischen Substrat sowie von nicht-leitenden Schichten auf einem leitenden eisenfreien Substrat mit Hilfe einer Schichtdickenmeßvorrichtung mit einer Meßsonde, wobei die Substrateigenschaften mit einer einzigen Sonde automatisch bestimmt werden und eine Schichtdickenmessung auf dem charakterisierten Substrat durchgeführt wird, und wobei das Verfahren folgende Schritte umfaßt: Prüfen, ob ein eisenhaltiges Substrat vorliegt, durch Messen einer magnetischen Flußdichte an einem Pol eines Permanentmagneten, der in der Meßsonde angeordnet ist; Automatisches Umschalten der Schichtdickenmeßvorrichtung um zu Prüfen, ob ein leitendes eisenfreies Substrat vorliegt, falls kein eisenhaltiges Substrat nachgewiesen wird; und Messen von Wirbelstromeffekten, die in einem leitenden eisenfreien Substrat durch Magnetfelder der Schichtdickenmeßvorrichtung erzeugt werden.

Das vorgenannte Ziel wird ebenfalls erreicht durch eine Schichtdickenmeßvorrichtung, insbesondere zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens, zur Messung sowohl von eisenfreien bzw. nicht-magnetischen Schichten auf einem eisenhaltigen bzw. magnetischen Substrat, als auch von nicht-leitenden Schichten auf einem leitenden eisenfreien Substrat, wobei die Schichtdickenmeßvorrichtung aufweist: einen Permanentmagneten; ein magnetisches Flußdichtesensormittel, insbesondere einen magnetischen Flußdichtesensor, das in Nähe einer Polfläche des Permanentmagneten angeordnet ist, um ein Magnetfeld in Nähe der Polfläche zu erfassen bzw. zu messen; eine Wirbelstrommeßspule, die um die Nähe der Polfläche herum angeordnet ist; und Steuermittel zum Empfang von Eingangssignalen des Sensormittels, insbesondere Sensors, sowie von der Meßspule und zur Berechnung einer Schichtdicke auf der Grundlage von einem oder mehreren Eingangssignalen.

Eine derartige kombinierte Schichtdickenmeßvorrichtung, die vorzugsweise als tragbare Handvorrichtung ausgebildet ist, ist besonders vorteilhaft in der Lage, sowohl eine eisenfreie Schicht auf einem eisenhaltigen Substrat, als auch eine nicht-leitende Schicht auf einem leitenden eisenfreien Substrat zu messen. Sie ist außerdem in der Lage ist, Substrateigenschaften und Messungen der Schichtdicke auf dem Substrat automatisch durchzuführen. Eine derartige Vorrichtung ermöglicht besonders vorteilhaft dem Bediener, nur eine einzelne Meßsondenspitze der Vorrichtung auf der Probe zu plazieren und mit geeigneten Meßinstrumenten, die mit der Meßsonde verbunden sind, den Substrattyp festzustellen und automatisch die Schichtdicke zu bestimmen.

Ferner wird das erfindungsgemäße Ziel erreicht durch eine Meßsonde, insbesondere für erfindungsgemäße Schichtdickenmeßvorrichtung zur Schichtdickenmessung von sowohl einer eisenfreien bzw. nicht-magnetischen Schicht auf einem eisenhaltigen bzw. magnetischen Substrat, als auch einer nicht-leitenden Schicht auf einem leitenden Substrat, wobei die Meßsonde derart ausgebildet ist, daß die Substrateigenschaften mit einer einzigen

Sonde automatisch bestimmt werden und eine Schichtdickenmessung auf dem charakterisierten Substrat durchgeführt wird, und wobei die Meßsonde aufweist: einen Permanentmagneten; ein Hall-Effekt-Magnetsensormittel, insbesondere einen Hall-Effekt-Magnetsensor, das in Nähe einer Polfläche des Permanentmagneten derart angeordnet sind, um ein Magnetfeld in Nähe der Polfläche zu messen; eine Wirbelstrommeßspule, die um die Nähe der Polfläche herum angeordnet ist; und ein Temperatursensormittel, insbesondere einen Thermistor, das mit den Hall-Effekt-Magnetsensormittel verbunden ist, um die Temperatur in Nähe des Hall-Effekt-Magnetsensormittels zu messen, wobei die gemessene Temperatur verwendet werden kann, um der insbesondere Schichtdickenmeßvorrichtung eine temperaturkompensierte bzw. -korrigierte magnetische Flußdichtenmessung zu liefern.

Hierdurch wird eine kompakte Schichtdickenmeßsonde realisiert, die eisenhaltige Substrate mit Hilfe des Hall-Sensors und eisenfreie Substrate mit Hilfe der Wirbelstromuntersuchungsspule untersucht, wobei automatisch von einem Betriebszustand in den anderen geschaltet wird, und wobei die Meßsonde die Oberfläche des beschichteten Substrat an höchstens einem Ort mit einer relativ kleinen Kontaktfläche kontaktiert.

Außerdem ermöglicht die Meßsonde besonders vorteilhaft bei der erfindungsgemäßen kombinierten Schichtdickenmeßvorrichtung die automatische Bestimmung der Substrateigenschaften mit einer einzelnen Sonde und gleichzeitig die Durchführung einer Messung der Schichtdicke in Abhängigkeit des Substrattyps. In der Meßsonde sind die Sensoren, die für die Durchführung beider Arten von Messungen benötigt werden, vorzugsweise in einer kompakten Sonde integriert.

Als eine Grundidee verwendet die Technik zur Schichtdickenmessung von Schichten auf einem eisenhaltigen Substrat einen Permanentmagneten, der einen konstanten magnetischen Fluß anlegt, sowie einen Hall- und einen Temperatursensor, insbesondere einen Thermistor, die an einem der Pole des Permanentmagneten angeordnet sind, um die von der Temperatur abhängige magnetische Flußdichte zu messen. Dabei besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der magnetischen Flußdichte am Magnetpol und der Dicke einer eisenfreien Schicht auf einem eisenhaltigen Substrat.

Die erfindungsgemäße Technik zum Messen von nicht-leitenden Schichten auf einem leitenden eisenfreien Substrat basiert im wesentlichen auf sogenannten Wirbelstromeffekten. Eine Spule in der Nähe der Meßsondenspitze wird durch einen veränderlichen Strom angeregt, der zwischen ca. 6 MHz und ca. 12 MHz oszilliert. Diese Spule induziert Wirbelströme an der Oberfläche des leitenden Substrates. Die resultierenden Wirbelströme bauen ihrerseits ein entgegengesetzt gerichtetes Magnetfeld auf, das umgekehrt auf die angeregte Spule einwirkt. Diese Wirbelstromeffekte an der Spule werden bestimmt bzw. quantifiziert durch Messen der Impedanz der Spule und die Veränderung (insbesondere Abnahme) der Wirbelstromeffekte an der Spule stehen im Zusammenhang mit der Schichtdicke der nicht-leitenden Schicht auf einem leitenden Substrat. Das heißt, die Spulenimpedanz ist ein Maß für die Schichtdicke einer nicht-leitenden Schicht, die auf einem leitenden Substrat aufgetragen ist.

Die Meßsonde der erfindungsgemäßen Meßvorrichtung bestimmt außerdem den Substrattyp, schaltet dann automatisch in den geeigneten Meßbetriebsmodus und bestimmt sodann die Schichtdicke der Schicht auf dem bestimmten bzw. charakterisierten Substrat.

Die erfindungsgemäße Meßsonde wird vorzugsweise in einer Schichtdickenmeßvorrichtung eingesetzt, die vorerst untersucht, ob ein eisenhaltiges Substrat vorliegt, — durch Messen der temperaturkompensierten bzw. -korrigierten magnetischen Flußdichte an einem Pol des Permanentmagneten mit Hilfe des Hall-Sensors und des Temperatursensors, insbesondere Thermistors. Dabei werden die Meßergebnisse der magnetischen Flußdichte und der Temperatur in temperaturkompensierte magnetische Flußdichtenwerte umgewandelt, die proportional sind zur Schichtdicke einer Schicht auf einem eisenhaltigen Substrat. Falls kein eisenhaltiges Substrat nachgewiesen wird, schaltet die Schichtdickenmeßvorrichtung automatisch in einen Betriebsmodus für die Untersuchung auf einem leitenden eisenfreien Substrat um, wobei die Wirbelstromeffekte, die im leitenden eisenfreien Substrat durch Magnetfelder der Schichtdickenmeßvorrichtung erzeugt werden, mit Hilfe einer Wirbelstrommeßspule untersucht bzw. gemessen werden. Dabei werden die Wirbelstrommeßergebnisse in einen Wirbelstromfrequenzwert umgewandelt, der proportional ist zur Schichtdicke einer Schicht auf einem leitenden eisenfreien Substrat.

Weitere Vorteile und Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele. In der Beschreibung wird auf die beigelegte schematische Zeichnung Bezug genommen. In der Zeichnung zeigen:

Fig. 1 (a) einen Querschnitt einer Meßsonde einer erfindungsgemäßen Meßvorrichtung entlang der Linie IA-IA in Fig. 1(b);

Fig. 1 (b) einen Querschnitt einer Meßsonde einer erfindungsgemäßen Meßvorrichtung entlang der Linie IB-IB in Fig. 1(a);

Fig. 2 eine Darstellung der Orientierung von Strömen und Feldern zur Veranschaulichung des Hall-Effekts;

Fig. 3 (a) eine Darstellung von magnetischen Feldlinien eines Permanentmagneten in einem Abstand d_1 oberhalb eines eisenhaltigen Substrats;

Fig. 3 (b) eine Darstellung von magnetischen Feldlinien eines Permanentmagneten in einem Abstand d_2 oberhalb eines eisenhaltigen Substrats, wobei $d_2 < d_1$ in Fig. 3(a);

Fig. 4 (a) ein Querschnitt einer Wirbelstromspule für die Verwendung in einem erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel entlang der Linie IIIA-III A in Fig. 4(b);

Fig. 4 (b) ein Querschnitt einer Wirbelstromspule für die Verwendung in einem erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel entlang der Linie IIIB-IIIB in Fig. 4(a);

Fig. 5 (a) eine Darstellung von magnetischen Feldlinien einer elektromagnetischen Spule in einem Abstand D_1 oberhalb eines eisenfreien leitenden Substrats;

Fig. 5 (b) eine Darstellung von Magnetfeldlinien einer elektromagnetischen Spule in einem Abstand D_2

oberhalb eines eisenfreien leitenden Substrats, wobei D_2 kleiner als D_1 in Fig. 5 (a);

Fig. 6 eine Darstellung einer Steuervorrichtung für eine Meßvorrichtung entsprechend einem erfindungsge-
mäßen Ausführungsbeispiel; und

Fig. 7 ein Flußdiagramm, das die Arbeitsschritte der Steuervorrichtung in Fig. 6 veranschaulicht.

Die Fig. 1 (a) und (b) zeigen ein erfindungsgemäßes Ausführungsbeispiel einer Meßsonde einer Schichtdicken-
meßvorrichtung im Querschnitt. Dabei sind die Querschnitte entlang der Linien IA-IA in Fig. 1 (b) bzw. der Linie
IB-IB in Fig. 1 (a) gezogen. Ein zylindrisches Sondengehäuse 20 umgibt einen zylindrischen Sondenkern 10. Der
Sondenkern 10 enthält eine ringförmige Wirbelstrommeßspule 60, die in kompakter Bauweise einen zylindri-
schen Hall-Effekt-Magnetsensor 50 umschließt. Dabei ist die Wirbelstrommeßspule 60 vorzugsweise in ther-
misch leitendem Epoxidharz 80 eingebettet, derart, daß die Wirbelstrommeßspule 60 im Probenkern 60 befestigt
ist und daß die Hitze abgeleitet wird, die durch Anregung der Wirbelstrommeßspule 60 erzeugt wird. Falls die
Wirbelstrommeßspule 60 durch einen Wechselstrom mit einer ausreichend hohen Frequenz (größer als etwa
1000 Hz) angeregt wird, erzeugt die Spule 60 Wirbelströme in einem darunter liegenden leitenden Substrat
zwischen der Substratoberfläche und der typischen Eindringtiefe des Substrats. Die Eindringtiefe des Substrats
ist abhängig von der Frequenz der Wechselstromanregung der Wirbelstrommeßspule 60 und ist darüberhinaus
abhängig vom Substrattyp. Bei der Meßsonde entsprechend der vorliegenden Erfindung kann die Wirbelstrom-
meßspule 60 durch Wechselstrom von ausreichend hoher Frequenz derart angeregt werden, daß die Eindringtie-
fe der Wirbelströme in das leitende Substrat so stark verringert wird, daß die Wirbelstromeffektmessung im
wesentlichen unempfindlich ist gegenüber Substratdickenschwankungen.

Der Hall-Effekt-Magnetsensor 50 ist an einem Ende eines zylindrischen Permanentmagneten 30 angeordnet,
um die magnetische Flußdichte in der Umgebung der Polfläche des Magneten 30 in nächster Nähe zum
Hall-Effekt-Magnetsensor 50 zu messen. Dabei wird der sogenannte Hall-Effekt ausgenützt, um das Magnetfeld
B durch den Hall-Effekt-Magnetsensor 50 zu bestimmen. Dabei steht das Magnetfeld B_j in Beziehung mit der
magnetischen Flußdichte ϕ durch eine Querschnittsfläche gemäß

$$\phi = \int \sum_i B_i dA_i$$

wobei sich die Integration über die relevante Querschnittsfläche mit dem Differentialflächenelement dA_i er-
streckt.

Fig. 2 ist eine Darstellung der Orientierung von Strömen und Feldern zur Veranschaulichung des Hall-Effekts.
Fig. 2 zeigt eine plattenförmige Probe 400 eines Leiters oder eines Halbleiters mit einer Dicke t in z-Richtung
und einer Weite w in y-Richtung. Die Probe führt eine Stromdichte J_x in x-Richtung und befindet sich in einem
Magnetfeld B_z in z-Richtung. Die Stromdichte J_x besteht aus einer Dichte n von Ladungsträgern, die jeweils eine
Ladung q transportieren und sich mit einer Driftgeschwindigkeit V_x in x-Richtung bewegen. Die Lorentzkraft
 $F_{Lorentz}$ ergibt sich dabei aus:

$$F_{Lorentz} = qE_i + q\epsilon_{ijk}v_jB_k$$

wobei E_i irgendein elektrisches Feld ist, welchem die Ladungsträger ausgesetzt sind, und wobei ϵ_{ijk} ein vollstän-
dig antisymmetrischer Tensor in den drei Raumrichtungen ist. Zu Beginn hat E_i den Wert Null, und die
Lorentzkraft $F_{Lorentz} = F_y = -qv_xB_z = -(J_x/b)B_z$ in die negative y-Richtung gerichtet, so daß die
Ladungsträger in die negative y-Richtung abgelenkt werden. Sobald sich die Ladungsträger an der Stirnseite der
Probe 400 (senkrecht zur negativen y-Richtung) sammeln, wird ein elektrisches Feld $E_y = E_x = V_xB_z =$
 $(J_x/(nq))B_z$ in positiver y-Richtung aufgebaut, um die gesamte Lorentzkraft $F_{Lorentz}$ zu neutralisieren bzw. um
der Lorentzkraft das Gleichgewicht zu halten. Dies führt zu einem Kräftegleichgewicht, wobei die Kräfte genau
ausgeglichen sind.

Das elektrische Kompensationsfeld E_y ist die Ursache für eine sogenannte Hall-Spannung $V_{Hall} = wE_y$, die
quer zur Probe 400 (in y-Richtung) verläuft und als Auswirkung des Hall-Effekts mit ausreichender Genauigkeit
bestimmt werden kann. Der Hall-Strom I_{Hall} durch die Probe 400 ergibt sich einfach aus der Stromdichte J_x , wie
 $I_{Hall} = wtJ_x$, und kann, ebenso wie die Hall-Spannung V_{Hall} mit ausreichender Genauigkeit gemessen werden.
Der Hall-Widerstand R_{Hall} ist dann definiert durch

$$R_{Hall} = \frac{V_{Hall}}{I_{Hall}} = \frac{w \left(\frac{J_x}{nq} \right) B_z}{wtJ_x} = \left(\frac{1}{nq} \right) \frac{B_z}{t} = R \frac{B_z}{t}$$

wobei die Beziehungen $V_{Hall} = wE_y = w(J_x/(nq))B_z$ und $I_{Hall} = wtJ_x$ verwendet wurden. Hervorgehoben sei der
vorstehende Zusammenhang zwischen dem Hall-Widerstand R_{Hall} und dem Hall-Koeffizienten $R = (1/(nq))$.
Der Hall-Koeffizient R wurde bereits für viele Leiter- und Halbleitermaterialien experimentell bestimmt. Daher
kann bei bekanntem Hall-Koeffizient R für das Material der Probe 400 und bei bekannter Dicke t der Probe 400
sowie durch genaues Messen der Hall-Spannung V_{Hall} und des Hall-Stromes I_{Hall} die Stärke des Magnetfeldes
 B_z dem die Probe 400 ausgesetzt ist, einfach bestimmt werden.

Dabei hängt der Hall-Koeffizient $R = (1/(nq))$ für ein bestimmtes Material von der Ladungsträgerdichte n im
Material ab. Die Ladungsträgerdichte n im Material hängt umgekehrt von der Temperatur des Materials ab, d. h.
 $n = n(T)$, wobei T die absolute Temperatur des Materials ist. Daher sind Messungen von Magnetfeldern mit

Hilfe des Hall-Effekts empfindlich von der Temperatur eines Hall-Effekt-Magnetsensors abhängig.

Erfindungsgemäß ist daher ein Temperatursensor 40, insbesondere ein Thermistor, am Hall-Effekt-Magnetsensor 50 angeordnet und steht in Kontakt mit dem Permanentmagneten 30. Der Temperatursensor 40 mißt die Temperatur des Hall-Effekt-Magnetsensors und liefert die Temperaturmeßergebnisse an eine Steuervorrichtung 90 der Schichtdickenmeßvorrichtung.

Eine Sondenspitze 70, die mit dem Sondenkern 10 verbunden ist, ragt durch bzw. aus dem Boden des Sondengehäuses 20 hervor. Die Sondenspitze 70 dient als Puffer zwischen dem Sondenkern 10 und einer Oberfläche des beschichteten Substrats, so daß ein bestimmter Abstand d zwischen dem beschichteten Substrat und dem Sondenkern 10 eingehalten wird — in der Annahme, daß die Achse der zylindrischen Symmetrie des Sondenkerns 10 im wesentlichen senkrecht zur planaren Oberfläche des beschichteten Substrats orientiert ist. Die Achse des zylindrischen Sondenkerns 10 wird vorzugsweise deshalb im wesentlichen senkrecht zur planaren Oberfläche des beschichteten Substrats gehalten, weil eine derartige Konfiguration eine größere Homogenität und Gleichmäßigkeit in den Messungen der magnetischen Flußdichte ϕ im Hall-Effekt-Magnetsensor 50 versichert. Aufgrund der definierten Sondenspitze 70 ist der Abstand zwischen Hall-Effekt-Magnetsensor 50 und der Schichtoberfläche bekannt; außerdem ist der Abstand zwischen der Polfläche des Permanentmagneten 30 des Hall-Effekt-Magnetsensors 50 und der Oberfläche der zu messenden Schicht auf dem Substrat bekannt. Bei der Durchführung einer Schichtdickenmessung wird die Sondenspitze 70 durch ein Bedienpersonal auf der zu messenden Schicht platziert, derart, daß die Achse der zylindrischen Symmetrie des Sondenkerns 10 im wesentlichen senkrecht zur Oberfläche des beschichteten Substrats verläuft. Die Steuervorrichtung 90 führt dann Messungen der magnetischen Flußdichte ϕ am Hall-Effekt-Magnetsensor 50 durch. Des weiteren führt die Steuervorrichtung 90 auch Messungen der Temperatur T des Hall-Effekt-Magnetsensors 50 durch. Dabei ist die Polfläche des Permanentmagneten 30 in unmittelbarer Nähe der Schichtoberfläche im wesentlichen parallel zur Schichtoberfläche orientiert, und damit auch im wesentlichen parallel zum darunter liegenden Substrat, was zusätzlich zu einer größeren Gleichmäßigkeit in der Messung der magnetischen Flußdichte ϕ sorgt. Die Messung der magnetischen Flußdichte ϕ wird mit Hilfe des Hall-Effekt-Magnetsensors 50 durchgeführt, der in Nähe der Polfläche des Permanent-Magneten 30 befestigt ist, und die Messung der Temperatur wird mit Hilfe des Temperatursensors 40 durchgeführt, der sowohl am Hall-Effekt-Magnetsensor 50, als auch am Permanent-Magnet 30 befestigt ist.

Der Hall-Effekt-Magnetsensor 50 ist mit der Steuervorrichtung 90 verbunden, um in konventioneller Art und Weise die magnetische Flußdichte ϕ in der Nähe der Polfläche des Permanentmagneten 30 anzuzeigen bzw. zu signalisieren. Analog dazu ist der Temperatursensor 40 mit der Steuervorrichtung 90 verbunden, um die Temperatur T des Hall-Effekt-Magnetsensors 50 anzuzeigen. Sodann wandelt die Steuervorrichtung 90 die angezeigten Meßwerte der magnetischen Flußdichte ϕ und der Temperatur T in bekannter Art und Weise in eine Größe um, die proportional ist zur temperaturkompensierten bzw. -korrigierten, magnetischen Flußdichte $\phi_{tempcomp}$ in der Nähe der Polfläche des Permanentmagneten 30.

Die Fig. 3 (a) und (b) veranschaulichen schematisch die magnetischen Feldlinien 31 sowie den Einfluß auf die magnetische Flußdichte ϕ an der Polfläche des Permanentmagneten 32, sobald der Magnet 32 in die Nähe eines eisenhaltigen Substrates 100 gebracht wird, dessen Oberfläche 102 im wesentlichen parallel zur Polfläche des Magneten 32 orientiert ist. Fig. 3 (a) zeigt den Magneten 32 in einem Abstand d_1 über einem eisenhaltigen Substrat 100, das im wesentlichen parallel zur Polfläche des Magneten 32 ausgerichtet ist. Die magnetische Flußdichte ϕ_1 wird dabei dargestellt durch die Anzahl von magnetischen Flußlinien 31, die durch einen Flächenabschnitt A laufen, dessen Flächengröße im wesentlichen derjenigen der Polfläche des Magneten 32 entspricht. Das Flächensegment A ist in der Nähe der Polfläche des Magneten 32 angeordnet, und zwar zwischen dem Magneten 32 und dem eisenhaltigen Substrat 100, und ist im wesentlichen parallel sowohl zur Polfläche des Magneten 32 als auch zum eisenhaltigen Substrat 100 orientiert.

Analog dazu zeigt Fig. 3 (b) den Magneten 32 in einem Abstand d_2 über einem eisenhaltigen Substrat 100, das im wesentlichen parallel zur Polfläche des Magneten 32 angeordnet ist. Die magnetische Flußdichte ϕ_2 entspricht der Anzahl der Magnetfeldlinien 31, die durch das Flächenelement A laufen, dessen Flächenausdehnung im wesentlichen derjenigen der Polfläche des Magneten 32 entspricht. Das Flächenelement A ist in der Nähe der Polfläche des Magneten 32 angeordnet, und zwar zwischen dem Magneten 32 und dem eisenhaltigen Substrat 100 und ist im wesentlichen parallel sowohl zur Polfläche des Magneten 32, als auch zum eisenhaltigen Substrat 100 orientiert.

Sobald der Magnet 32 an das eisenhaltige Substrat angenähert wird, nimmt die Anzahl der Magnetfeldlinien 31 zu, die von der Polfläche des Magneten 32 ausgehen, und im ferromagnetischen eisenhaltigen Substrat hoher Permeabilität 100 münden. Daher nimmt auch die Anzahl der Magnetfeldlinien 31 zu, die durch den Flächenabschnitt A laufen, sobald der Magnet 32 näher an das eisenhaltige Substrat 100 heranrückt. D.h., daß die magnetische Flußdichte ϕ zunimmt, wenn der Abstand d zwischen Magnet 32 und eisenhaltigem Substrat 100 abnimmt. Die Fig. 3 (a) und (b) veranschaulichen, daß $\phi_2 > \phi_1$, falls $d_2 < d_1$. Somit steht die magnetische Flußdichte ϕ in reziprokem Verhältnis zum Abstand d zwischen Magnet 32 und eisenhaltigem Substrat 100. Die Beziehung zwischen gemessener magnetischer Flußdichte ϕ und dem Abstand d zwischen Magnet 32 und eisenhaltigem Substrat 100 kann verwendet werden, um eine Meßvorrichtung zu kalibrieren, welche die Dicke einer eisenfreien Schicht auf einem eisenhaltigen Substrat 100 bestimmt.

Das Ausgangssignale des Temperatursensors 40, das der Temperatur T des Hall-Effekt-Sensors 50 entspricht, wird von der Steuervorrichtung 90 dazu verwendet, um eine Temperaturkompensation für das Ausgangssignal der magnetischen Flußdichte ϕ vom Hall-Effekt-Magnetsensor 50 durchzuführen, indem experimentell bestimmte Kompensations- bzw. Korrekturfaktoren für jede beliebige Kombination von Hall-Effekt-Sensor 50 und Permanentmagnet 30 verwendet werden. Für die temperaturkompensierte magnetische Flußdichte $\phi_{tempcomp}$ kann experimentell eine Beziehung zum Abstand $d_{coating}$ zwischen der Sondenspitze 70 und einem darunter

liegenden eisenhaltigen Substrat(oberfläche) gefunden werden, was der Schichtdicke einer Schicht auf dem Substrat entspricht. Hierdurch kann eine mathematische Beziehung, vorzugsweise in der Form

$$\varphi^{\text{tempcomp}} \propto \left(\frac{1}{d^{\text{coating}}} \right)^v$$

5

wobei v ein entsprechend anpaßbarer Exponent ist, bestimmt werden, um die experimentellen Punkte bzw. den experimentellen Kurvenverlauf näherungsweise auszugleichen. Mit Hilfe dieser experimentell bestimmten mathematischen Funktion kann die Steuervorrichtung 90 die Schichtdicke d^{coating} einer eisenfreien Schicht aus Messungen der temperaturkompensierten magnetischen Flußdichte $\varphi^{\text{tempcomp}}$ bestimmt werden.

Der Aufbau mit Wirbelstrommeßspule 60 ist in den Fig. 4(a) und (b) veranschaulicht. Dabei ist die Spule 60 parallel zur Schicht und zum Substrat angeordnet, um eine bessere Gleichmäßigkeit der Messungen entlang der Fläche der Spule 60 zu erzielen, die durch den Innendurchmesser aufgespannt wird, wie in Fig. 4 (a) gezeigt. Vorzugsweise wird die Spule 60 aus ca. 60 Windungen von 30 AWG (American Wire Gauge) Draht gefertigt, die in Scheibenspulenkonfigurationen gewickelt sind, mit einem Innendurchmesser von ca. 3 mm, einem Außendurchmesser von ca. 5,25 mm und einer Dicke von ca. 0,5 mm. Die in den Fig. 1(a) und (b) gezeigt, ist die Wirbelstrommeßspule 60 um den Hall-Effekt-Magnetsensor 50 herumgewickelt, wobei hierdurch Platz gespart wird, ein kompakter Sondenkern 10 realisiert wird, und daher insgesamt ein kompakter Aufbau der Meßsonde ermöglicht wird. Eine derartige kompakte Meßsonde hat insbesondere den Vorteil, daß sie nur eine relativ kleine Kontaktfläche mit dem beschichteten Substrat benötigt. Erfindungsgemäß wird die Kontaktfläche durch die Ausdehnung bzw. Fläche der Sondenspitze 70 am Kontaktpunkt mit dem beschichteten Substrat bestimmt. Eine möglichst geringe Kontaktfläche ist insbesondere dann von Vorteil, wenn die Schichtdicke einer Schicht auf einem erhitzten beschichteten Substrat bestimmt werden soll. Außerdem verringert die erfindungsgemäße Anordnung der Spule 60 dicht an der Sondenspitze 70, d. h. in unmittelbarer Nähe der Oberfläche des beschichteten Substrats, den Spalt bzw. Luftspalt zwischen der Spule 60 und den im Substrat induzierten Wirbelströmen. Hierdurch wird die magnetische Kopplung zwischen der Spule 60 und den induzierten Gleichströmen verstärkt und genaueste Messungen der gegenseitigen Einflüsse ermöglicht, die Spule 60 und die induzierten Gleichströme gegenseitig ausüben.

Die Wirbelstrommeßspule 60 wird durch einen Wechselstrom angeregt, der mit einer Frequenz zwischen ca. 6 MHz und ca. 12 MHz oszilliert, so daß Wirbelströme an bzw. in der Nähe der Oberfläche des leitenden Substrats 110 induziert werden. Die Gleichströme, die durch die Spule 60 induziert werden, bewirken umgekehrt ein Magnetfeld in entgegengesetzter Richtung, entsprechend der Lenz'schen Regel. Die Wirbelstrommeßspule 60 weist demnach eine resultierende magnetische Nettoflußdichte φ^{net} weist, welche der Differenz zwischen der magnetischen Anregungsflußdichte φ^{excite} und der magnetischen Wirbelstromflußdichte φ^{eddy} gemäß der Gleichung

$$\varphi^{\text{net}}(z,t) = \varphi^{\text{excite}}(z,t) - \varphi^{\text{eddy}}(z,t)$$

entspricht. In dieser Gleichung sind die Abhängigkeiten der magnetischen Flußdichten φ von der Zeit t und der Höhe z der Spule 60 über der planaren Oberfläche des eisenfreien planaren Substrats angegeben, das senkrecht zur Symmetrieachse der Spule 60 angeordnet ist. Die magnetische Nettoflußdichte φ^{net} durch die Spule 60 beeinflusst die Impedanz Z^{Spule} der Spule 60.

Die Fig. 5(a) und (b) veranschaulichen schematisch eine Momentaufnahme der Magnetfeldlinien 31 und die Auswirkungen auf die magnetischen Nettoflußdichte φ^{net} , welche die Spule 60 umgibt, sobald die Spule 60 in die Nähe einer eisenfreien leitenden Materials 110 gebracht wird, dessen Oberfläche 112 im wesentlichen parallel zur Querschnittsfläche der Spule 60 verläuft. Die Momentaufnahme in den Fig. 5 (a) und (b) entspricht dem Zeitpunkt, in dem das durch die Spulen induzierte Magnetfeld einen Maximalwert mit nach unten gerichteter Feldkomponente erreicht. Fig. 5 (a) zeigt die Spule 60 in einem Abstand D_1 über der Oberfläche 112 eines eisenfreien leitenden Substrats 110, die im wesentlichen parallel zur Querschnittsfläche der Spule 60 angeordnet ist. Die momentane magnetische Flußdichte φ^{excite} im Abstand D_1 wird dargestellt durch die Anzahl der nach unten gerichteten Magnetfeldlinien 31, die durch die Spule 60 hindurchlaufen. Analog dazu wird die momentane magnetische Gleichstromflußdichte φ^{eddy} im Abstand D_1 dargestellt durch die Anzahl der nach oben gerichteten Magnetfeldlinien 31, die durch die Spule 60 hindurchtreten. Die momentanen Wirbelströme 32 sind ebenfalls an der Oberfläche 112 dargestellt.

Fig. 5 (b) zeigt die Spule 60 in einem Abstand D_2 über der Oberfläche 112 eines eisenfreien leitenden Substrats 110, das im wesentlichen parallel zur Querschnittsfläche der Spule 60 ausgerichtet ist. Auch hier wird die momentane magnetische Flußdichte φ^{excite} in einem Abstand D_2 dargestellt durch die Anzahl der nach unten gerichteten Magnetfeldlinien 31, die durch die Spule 60 hindurchtreten. Die momentane magnetische Wirbelstromdichte φ^{eddy} im Abstand D_2 entspricht der Anzahl der nach oben gerichteten Magnetfeldlinien 31, die durch die Spule 60 hindurchtreten, wobei die momentanen Wirbelströme 32 an der Oberfläche 112 ebenfalls dargestellt sind.

Sobald die Spule 60 näher an das eisenfreie leitende Substrat 110 heranrückt, nimmt die Nettoanzahl der Magnetfeldlinien 31 ab, welche die Spule 60 umgeben. Daher nimmt auch die Nettoanzahl der Magnetfeldlinien 31 ab, die durch die Querschnittsfläche der Spule 60 hindurchtreten, sobald die Spule 60 näher am eisenfreien leitenden Substrat 110 ist, so daß auch die magnetische Nettoflußdichte φ^{net} abnimmt, sobald der Abstand D zwischen der Spule 60 und dem eisenfreien leitenden Substrat 110 abnimmt. Die Fig. 5 (a) und (b) veranschaulichen eindrucksvoll, daß die magnetische Nettoflußdichte $\varphi^{\text{net}} = \varphi^{\text{excite}} - \varphi^{\text{eddy}}$ abnimmt, falls $D_2 < D_1$. D.h., daß

die magnetische Flußdichte φ^{net} in einer direkten Relation zum Abstand D zwischen der Spule 60 und dem eisenfreien leitenden Substrat 110 steht. Diese Beziehung zwischen der gemessenen magnetischen Flußdichte φ^{net} und dem Abstand D zwischen der Spule 60 und dem eisenfreien leitenden Substrat 110 kann verwendet werden, um eine Meßvorrichtung zu kalibrieren, welche die Dicke einer nicht-leitenden Schicht auf einem eisenfreien leitenden Substrat 110 bestimmt.

Sobald also die Spule 60 näher an die planare Oberfläche 112 des eisenfreien leitenden Substrats 110 herangebracht wird (wobei die Oberfläche 112 senkrecht zur Symmetrieachse der Spule 60 orientiert ist), umgibt ein größerer Anteil der magnetischen Wirbelstromflußdichte φ^{eddy} die Spule 60, wobei hierdurch die gesamte die Spule 60 umgebende Nettoflußdichte φ^{net} reduziert wird. Da die Impedanz Z^{Spule} der Spule 60 proportional zur magnetischen Nettoflußdichte φ^{net} ist, welche die Spule 60 umgibt, ist die Impedanz Z^{Spule} der Spule 60 ebenfalls abhängig vom Abstand der Spule 60 von der Oberfläche des leitenden Substrats 110.

Erfindungsgemäß ermittelt die Steuervorrichtung 90, die mit der Spule 60 verbunden ist, auf konventionelle Art und Weise die Impedanz Z^{Spule} der Spule 60. Aus derartigen Experimenten kann ohne weiteres eine Beziehung zwischen der gemessenen Impedanz Z^{Spule} der Spule 60 und dem Abstand D^{coating} zwischen der Sondenspitze 70 und einer darunter liegenden leitenden Substratoberfläche (wobei der Abstand D^{coating} der Dicke einer auf dem Substrat aufgetragenen Schicht entspricht), bestimmt werden. Hieraus kann eine mathematische Beziehung, vorzugsweise in der Form

$$Z^{\text{coil}} \propto \varphi^{\text{net}} \propto (D^{\text{coating}})^{\xi}$$

bestimmt werden, wobei ξ ein entsprechend anpaßbarer Exponent ist, um die experimentell gewonnenen Daten bzw. Punkte anzunähern. Mit Hilfe einer derartigen experimentell gewonnenen mathematischen Funktion bestimmt die Steuervorrichtung 90 die Schichtdicke D^{coating} einer nicht leitenden Schicht auf einem leitenden Substrat aus den Messungen der Impedanz Z^{Spule} der Spule 60.

Wie in den Fig. 1(a) und (b) sowie in Fig. 6 gezeigt, empfängt die Steuervorrichtung 90 Eingangssignale vom Hall-Effekt-Magnetsensor 50, vom thermischen Sensor 40 und von der Wirbelstrommeßspule 60, und gibt Steuersignale an diese weiter. Die Steuervorrichtung 90 gibt ebenfalls Signale an das Anzeigegerät 95 aus, um die gemessene Schichtdicke anzuzeigen. Die Steuervorrichtung 90 empfängt Eingangssignale von einer Anwenderschnittstelle bzw. Interface 120. Elektrische Verbindungen sind in Fig. 6 durch durchgezogene Linien dargestellt, während thermische Verbindungen bzw. Kopplungen in Fig. 6 durch gestrichelte Linien veranschaulicht werden. In einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wird die thermische Kopplung zwischen Wirbelstrommeßspule 60, thermischem Sensor 40, Hall-Effekt-Magnetsensor 50 und Permanentmagnet 30 durch thermisch leitendes Epoxidharz 80 realisiert, wie in Fig. 1(b) dargestellt.

In einem besonders bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung enthält die Steuervorrichtung 90 einen geeigneten konventionellen Mikroprozessor, der mit den erforderlichen Eingang-/Ausgang-Übertragungskanälen ausgestattet ist. Die Steuervorrichtung 90 beschränkt den Meßbereich von d^{coating} auf einem eisenhaltigen Substrat auf einem bestimmten, beliebig ausgewählten Wert d^{max} , derart, daß die Steuervorrichtung 90 bei der Anzeige von d^{coating} auf einem eisenhaltigen Substrat größer als d^{max} automatisch umschaltet, und versucht, die Schichtdicke mit Hilfe konventioneller Wirbelstromtechniken zu messen, die ebenfalls die Wirbelstrommeßspule 60 verwenden. Der vorgegebene beliebige Wert d^{max} wird in bekannter Form in einem Speicherfeld der Steuervorrichtung 90 abgelegt. Beispielsweise wird bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Meßvorrichtung, die für die Messung von Schichtdicken bis zu ca. 60 mil (= Millizoll; ca. 1,524 mm) verwendet wird, der Wert von d^{max} vorzugsweise auf ca. 80 mil (ca. 2,032 mm) wahlweise festgelegt.

Der Einfluß von Wirbelströmen, die in eine darunter liegendes, eisenfreies leitendes Substrat induziert wurden, auf ein externes Magnetfeld in der Nähe des Substrates ist physikalisch unabhängig davon, ob das externe Magnetfeld durch einen Permanentmagneten, z. B. Permanentmagnet 30, oder durch eine elektromagnetische Spule, z. B. Spule 60, erzeugt wird. Wie in Fig. 5 (b) gezeigt, besagt die Lenz'sche Regel, daß die resultierende Wirkung des Magnetfeldes, das durch die induzierten Wirbelströme 32 im leitenden Substrat erzeugt wird, daß die Nettoanzahl der Magnetfeldlinien 31 durch den Flächenabschnitt A reduziert wird, — und zwar durch Subtraktion der Anzahl der nach oben gerichteten Magnetfeldlinien durch den Flächenabschnitt A von der Anzahl der nach unten gerichteten Magnetfeldlinien durch den Flächenabschnitt A. Daher nimmt die magnetische Nettoflußdichte φ^{net} ab, aufgrund der im leitenden Substrat induzierten Wirbelströme. Die Verringerung der magnetischen Nettoflußdichte φ^{net} als Ergebnis der Wirbelströme 32, die im leitenden Substrat induziert wurden, ist umso größer, je näher die Sondenspitze 70 an das darunter liegende leitende Substrat heranrückt, d. h., die Verringerung von φ^{net} nimmt zu für dünnere Schichten. Die Abnahme der magnetischen Nettoflußdichte φ^{net} — als Ergebnis der in einem darunter liegenden leitenden Substrat induzierten Wirbelströme 32 bei Verringerung der Distanz des Abstandes d zwischen der Sondenspitze 70 und dem darunter liegenden leitenden Substrat — verhält sich genau entgegengesetzt zur Zunahme der magnetischen Nettoflußdichte φ^{net} , sobald der Abstand d zwischen der Sondenspitze 70 und einem darunter liegenden eisenhaltigen Substrat abnimmt.

Falls die temperaturkompensierte magnetische Flußdichte $\varphi^{\text{tempcomp}}$ einer Schichtdicke d^{coating} entspricht, welche den vorbestimmten Schwellenwert d^{max} überschreitet, nimmt die Steuerung 90 automatisch an, daß anstelle einer außerordentlich dicken eisenfreien Schicht mit einer Schichtdicke d^{coating} auf einem eisenhaltigen Substrat ein darunter liegendes leitendes Substrat vorhanden sein muß. Sodann schaltet die Steuerung 90 automatisch auf den Meßmodus um, um die induzierten Wirbelstromeffekte direkt und mit h. her Genauigkeit zu messen und auf diese Weise die Schichtdicke D^{coating} der nicht-leitenden Schicht auf dem eisenfreien leitenden Substrat zu bestimmen.

Falls der Anwender schon im Vorfeld der Messung weiß, daß nur eine Messung von einer nicht-leitenden Schicht auf einem leitenden Substrat benötigt wird, kann er die Steuerung 90 mit Hilfe der Anwenderschnittstelle

le 120 derart schalten bzw. sperren, daß nur Schichtdickenmessungen mit Hilfe der Wirbelstrommeßspule 60 durchgeführt werden. Falls aber der Bediener die Steuerung 90 nicht schaltet bzw. sperrt, bestimmt die Steuerung 90 zuerst die temperaturkompensierte magnetische Flußdichte ϕ^{tempcomp} und führt eine Prüfung durch, ob d^{coating} größer ist als d^{max} , bevor die induzierten Wirbelstromeffekte tatsächlich gemessen werden.

Die operationelle Betriebsweise der Steuerung 60 wird in Fig. 7 in Form eines Flußdiagramms veranschaulicht. Zunächst prüft die Steuerung 90 im Schritt 900, ob die Steuerung 90, wie vorstehend erwähnt, vom Bediener gesperrt wurde, bzw. ob die Sperre gesetzt wurde. Falls die Sperre auf AN ist (d. h. gesetzt ist), fährt die Steuerung 90 mit Schritt 1060 fort. Falls die Sperre auf AUS ist, geht die Steuerung 90 zu Schritt 1000 über. Die Steuerung 90 aktiviert den Hall-Effekt-Magnetsensor 50 und die vom Hall-Effekt-Magnetsensor gemessene magnetische Flußdichte ϕ wird an die Steuerung 90 im Schritt 1000 eingegeben. Im Schritt 1010 wird die durch den Thermistor 40 gemessene Temperatur T ebenfalls in die Steuerung 90 eingegeben. Die Steuerung 90 verwendet dann die Eingabe der magnetischen Flußdichte ϕ und der Temperatur T dazu, um die temperaturkompensierte magnetische Flußdichte ϕ^{tempcomp} im Schritt 1020 zu bestimmen. Des weiteren stellt die Steuerung 90 einen Zusammenhang zwischen der temperaturkompensierten magnetischen Flußdichte ϕ^{tempcomp} und dem Abstand d^{coating} zwischen der Sondenspitze 70 und einem darunter liegenden eisenhaltigen Substrat im Schritt 1030 her. Vorzugsweise stellt die Steuerung 90 eine Beziehung zwischen der temperaturkompensierten magnetischen Flußdichte ϕ^{tempcomp} und dem Abstand d^{coating} im Schritt 1030 her, anhand der nachfolgenden mathematischen Beziehung

$$\phi^{\text{tempcomp}} = k_{\text{EXP}} \left(\frac{1}{d^{\text{coating}}} \right)^{v_{\text{EXP}}}$$

wobei k_{EXP} eine experimentell bestimmte Proportionalitätskonstante und v_{EXP} ein experimentell bestimmter Exponent ist.

Sodann prüft die Steuerung 90 im Schritt 1040, ob der Abstand d^{coating} , der im Schritt 1030 berechnet wurde, größer ist als ein vorbestimmter Maximalwert d^{max} . Falls der Abstand d^{coating} kleiner ist als der vorbestimmte Maximalwert d^{max} , gibt die Steuerung 90 dem Anzeigegerät 95 im Schritt 1050 ein Signal, um den Abstand d^{coating} als die gemessene Schichtdicke einer eisenfreien Schicht auf einem eisenhaltigen Substrat anzuzeigen. Die Steuerung kehrt dann zum Schritt 900 zurück, um wiederum zu prüfen, ob die Sperre gesetzt wurde oder nicht.

Falls die Prüfung im Schritt 1040 ergibt, daß d^{coating} größer ist als der vorbestimmte Maximalwert d^{max} , aktiviert die Steuerung 90 die Wirbelstrommeßspule 60 und empfängt dann die magnetische Nettoflußdichte $\phi^{\text{net}} = \phi^{\text{excite}} - \phi^{\text{eddy}}$ im Schritt 1060. Die Steuerung 90 stellt eine Beziehung her zwischen der magnetischen Nettoflußdichte ϕ^{net} und dem Abstand D^{coating} zwischen der Sondenspitze 70 und einem darunter liegenden eisenfreien leitenden Substrat im Schritt 1070. Vorzugsweise stellt die Steuerung 90 eine Beziehung zwischen der magnetischen Nettoflußdichte ϕ^{net} und dem Abstand D^{coating} her im Schritt 1070 anhand der nachfolgenden mathematischen Beziehung

$$\phi^{\text{net}} = K_{\text{EXP}} (D^{\text{Coating}})^{\xi_{\text{EXP}}}$$

wobei K_{EXP} eine experimentell bestimmte Proportionalitätskonstante und ξ_{EXP} ein experimentell bestimmter Exponent ist.

Nachfolgend prüft die Steuerung 90 im Schritt 1075, ob der Abstand D^{coating} , der im Schritt 1070 berechnet wurde, größer ist als ein vorbestimmter Maximalwert D^{max} . Falls der Abstand D^{coating} kleiner ist als der vorbestimmte Maximalwert D^{max} übergibt die Steuerung 90 dem Anzeigegerät 95 im Schritt 1080 ein Signal, um den Abstand D^{coating} als die gemessene Schichtdicke einer nicht-leitenden Schicht auf einem eisenfreien Substrat anzuzeigen. Sodann kehrt die Steuerung 90 zum Schritt 900 zurück, um erneut zu prüfen, ob die Sperre gesetzt wurde oder nicht.

Falls die Prüfung im Schritt 1040 ergibt, daß D^{coating} größer ist als der vorbestimmte Maximalwert D^{max} , meldet die Steuerung 90 dem Anzeigegerät 95 im Schritt 1085, den Meßwert als ungültig anzuzeigen. Die Steuerung 90 kehrt sodann zum Schritt 900 zurück, um zu überprüfen, ob die Sperre gesetzt wurde.

Bei einem alternativen Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Meßsonde wird der Permanentmagnet 30 durch ein zylindrisches ferromagnetisches Kernstück ersetzt. Bei dieser vorteilhaften Ausführung ist die Spule 60 nicht um den Hall-Effekt-Magnetsensor 50 gewickelt, sondern um das Ende des zylindrischen ferromagnetischen Kernstückes, das am nächsten beim Hall-Effekt-Magnetfenster 50 liegt. Sobald die Steuerung 90 die Spule 60, die rund um das zylindrische ferromagnetische Kernstück gewickelt ist, mit einem Nullfrequenzstrom, d. h. einem Gleichstrom (D.C.), anregt, wird dadurch ein Elektromagnet erzielt, der besonders effektiv den Platz des Permanentmagneten 30 im vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiel einnimmt. Bei dieser alternativen Ausführung wird besonders vorteilhaft durch die Steuerung 90 versichert, daß die Spule 60 im wesentlichen zur selben Zeit mit Gleichstrom angeregt wird, wie der Hall-Effekt-Magnetsensor 50 aktiviert wird (sobald die Meßvorrichtung die Messung der Schichtdicke einer eisenfreien Schicht auf einem eisenhaltigen Substrat angeht).

Die vorliegende Erfindung sowie ihre Vorteile wurden vorstehend anhand von spezifischen Ausführungsbeispielen veranschaulicht. Dabei ist es dem Fachmann klar, daß die Erfindung nicht auf diese Ausführungsbeispiele beschränkt ist und daß die der Erfindung zugrundeliegenden Prinzipien ausgeführt und angewendet werden können in Vorrichtungen und Verfahren, die geringfügig von den vorstehend spezifisch Beschriebenen abwei-

chen können. Beispielsweise ist die verwendete Bezeichnung "eisenhaltige Substrate" nicht einschränkend zu verstehen, sondern bezieht sich ganz allgemein auf alle Arten von "magnetischen Substraten" und ähnliche. Dasselbe gilt für die Bezeichnung "eisenfreie Schichten", worunter ganz allgemein sämtliche Arten von "nicht-magnetischen Schichten" und ähnliche zu verstehen sind. Daher sollte die Erfindung nicht als auf die beschriebenen spezifischen Ausführungsbeispiele beschränkt verstanden werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Schichtdickenmessung von eisenfreien bzw. nicht-magnetischen Schichten auf einem eisenhaltigen bzw. magnetischen Substrat sowie von nicht-leitenden Schichten auf einem leitenden eisenfreien Substrat mit Hilfe einer Schichtdickenmeßvorrichtung mit einer Meßsonde, wobei die Substrateigenschaften mit einer einzigen Sonde automatisch bestimmt werden und eine Schichtdickenmessung auf dem charakterisierten Substrat durchgeführt wird, und wobei das Verfahren folgende Schritte umfaßt:
 - a) Prüfen, ob ein eisenhaltiges Substrat vorliegt, durch Messen einer magnetischen Flußdichte an einem Pol eines Permanentmagneten (30), der in der Meßsonde angeordnet ist;
 - b) Automatisches Umschalten der Schichtdickenmeßvorrichtung um zu Prüfen, ob ein leitendes eisenfreies Substrat vorliegt, falls kein eisenhaltiges Substrat nachgewiesen wird; und
 - c) Messen von Wirbelstromeffekten, die in einem leitenden eisenfreien Substrat durch Magnetfelder der Schichtdickenmeßvorrichtung erzeugt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ferner eine Temperaturkompensation bzw. -korrektur der magnetischen Flußdichte mit Hilfe eines Temperatursensors durchgeführt wird.
3. Schichtdickenmeßvorrichtung, insbesondere zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorstehenden Ansprüche, zur Messung sowohl von eisenfreien bzw. nicht-magnetischen Schichten auf einem eisenhaltigen bzw. magnetischen Substrat, als auch von nicht-leitenden Schichten auf einem leitenden eisenfreien Substrat, wobei die Schichtdickenmeßvorrichtung aufweist:
 - a) einen Permanentmagneten (30);
 - b) ein magnetisches Flußdichtesensormittel, insbesondere einen magnetischen Flußdichtesensor, das in Nähe einer Polfläche des Permanentmagneten (30) angeordnet ist, um ein Magnetfeld in Nähe der Polfläche zu erfassen bzw. zu messen;
 - c) eine Wirbelstrommeßspule (60), die um die Nähe der Polfläche herum angeordnet ist; und
 - d) Steuermittel zum Empfang von Eingangssignalen des Sensormittels, insbesondere Sensors, sowie von der Meßspule und zur Berechnung einer Schichtdicke auf der Grundlage von einem oder mehreren Eingangssignalen.
4. Vorrichtung nach Anspruch 3 gekennzeichnet durch ein Temperatursensormittel, das mit dem magnetischen Flußdichtesensormittel verbunden ist, zur Temperaturmessung in Nähe des magnetischen Flußdichtesensormittels, wobei die gemessene Temperatur verwendet werden kann, um der Schichtdickenmeßvorrichtung eine temperaturkompensierte bzw. -korrigierte magnetische Flußdichtenmessung zu liefern.
5. Vorrichtung nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Permanentmagnet, das magnetische Flußdichtesensormittel und die Wirbelstrommeßspule (60) in einer einzigen Meßsonde untergebracht sind.
6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3—5, dadurch gekennzeichnet, daß ferner ein Temperatursensor enthalten ist, um die Temperatur in der Nähe des magnetischen Flußdichtesensors zu erfassen bzw. zu messen.
7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3—6, dadurch gekennzeichnet, daß das magnetische Flußdichtesensormittel ein Hall-Effekt-Magnetsensor (50) ist.
8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3—7, dadurch gekennzeichnet, daß das Temperatursensormittel, insbesondere der Temperatursensor, ein Thermistor ist.
9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3—8, dadurch gekennzeichnet, daß die Wirbelstrommeßspule (60) etwa 60 Windungen von 39 AWG-Draht aufweist, die in einer Scheibenspulenkonfiguration gewickelt sind, mit einem Innendurchmesser von ca. 3 mm, einem Außendurchmesser von ca. 5,25 mm und einer Dicke von ca. 0,5 mm.
10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3—9, dadurch gekennzeichnet, daß die Wirbelstrommeßspule (60) durch einen Wechselstrom angeregt wird, der mit einer Frequenz zwischen ca. 6 MHz und ca. 12 MHz oszilliert.
11. Meßsonde, insbesondere für eine Schichtdickenmeßvorrichtung zur Schichtdickenmessung von sowohl einer eisenfreien bzw. nicht-magnetischen Schicht auf einem eisenhaltigen bzw. magnetischen Substrat, als auch einer nicht-leitenden Schicht auf einem leitenden Substrat, wobei die Meßsonde derart ausgebildet ist, daß die Substrateigenschaften mit einer einzigen Sonde automatisch bestimmt werden und eine Schichtdickenmessung auf dem charakterisierten Substrat durchgeführt wird, und wobei die Meßsonde aufweist:
 - a) einen Permanentmagneten (30);
 - b) ein Hall-Effekt-Magnetsensormittel, insbesondere einen Hall-Effekt-Magnetsensor (50), das in Nähe einer Polfläche des Permanentmagneten (30) derart angeordnet sind, um ein Magnetfeld in Nähe der Polfläche zu messen;
 - c) eine Wirbelstrommeßspule (60), die um die Nähe der Polfläche herum angeordnet ist; und
 - d) ein Temperatursensormittel, insbesondere einen Thermistor, das mit dem Hall-Effekt-Magnetsensormittel verbunden ist, um die Temperatur in Nähe des Hall-Effekt-Magnetsensormittels zu messen, wobei die gemessene Temperatur verwendet werden kann, um der insbesondere Schichtdickenmeßvorrichtung eine temperaturkompensierte bzw. -korrigierte magnetische Flußdichtenmessung zu liefern.

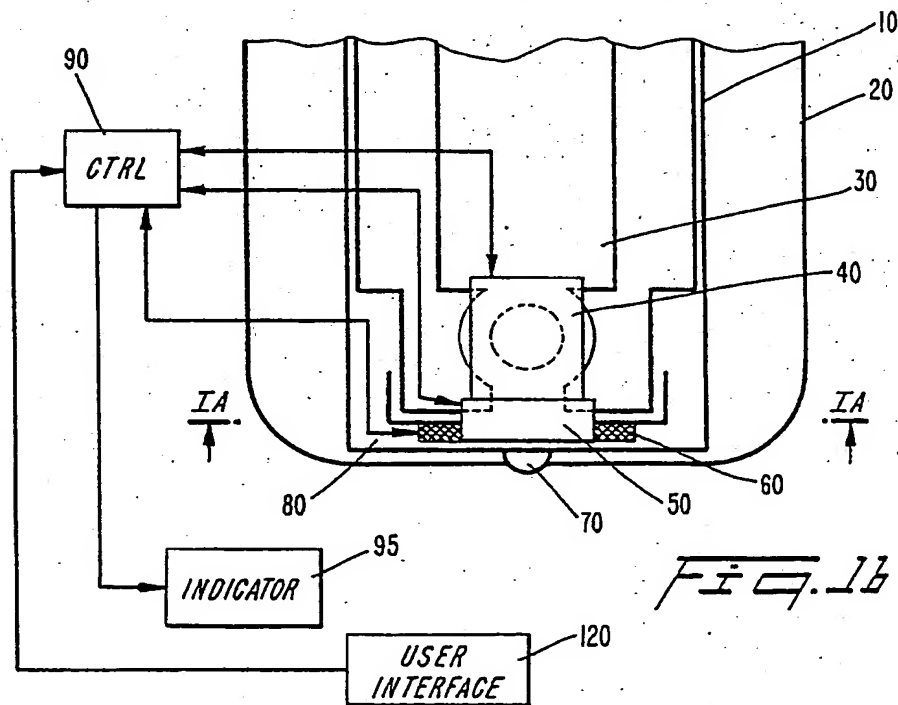
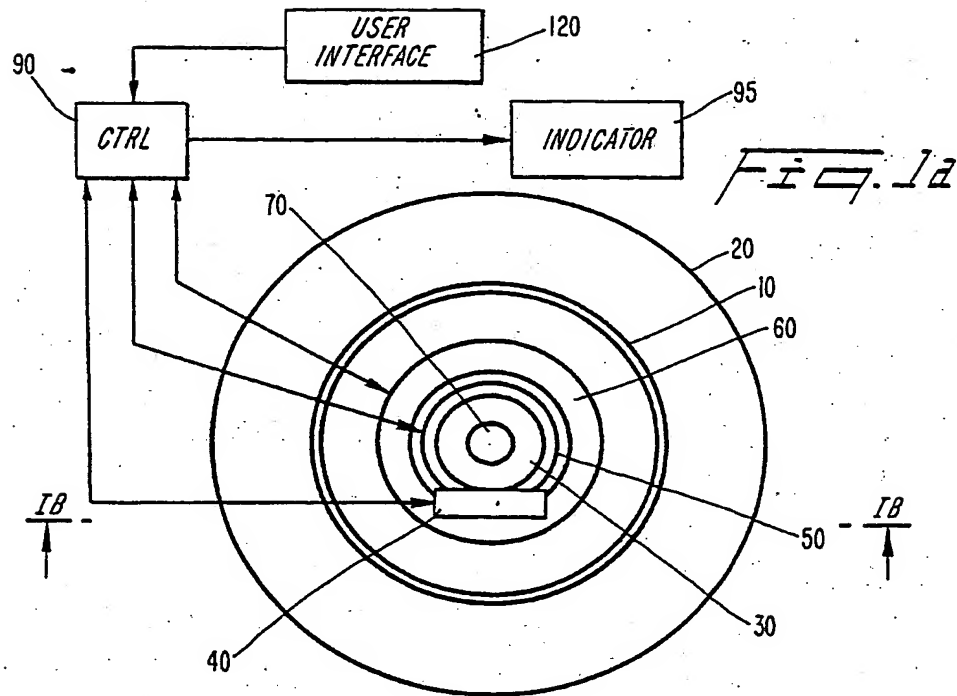
fern.

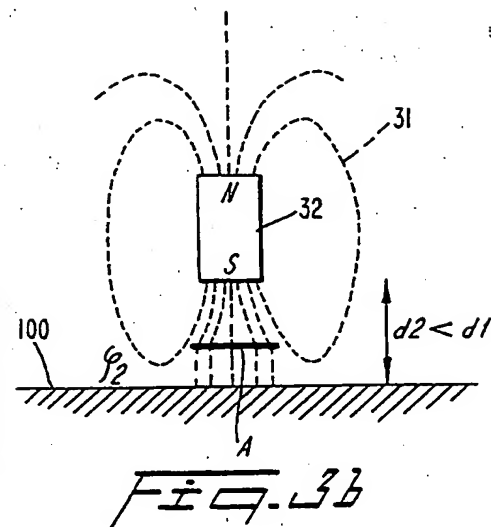
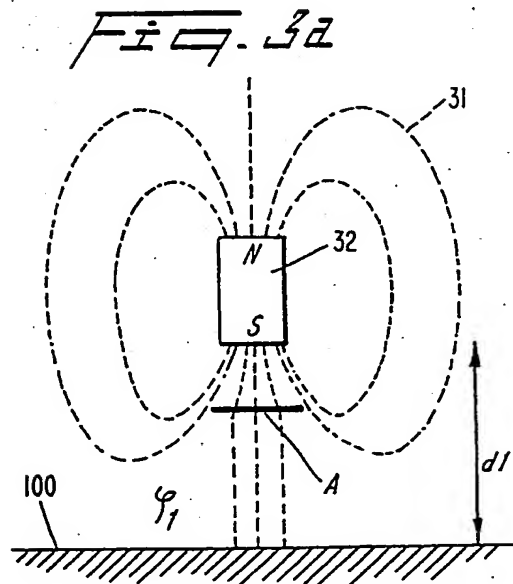
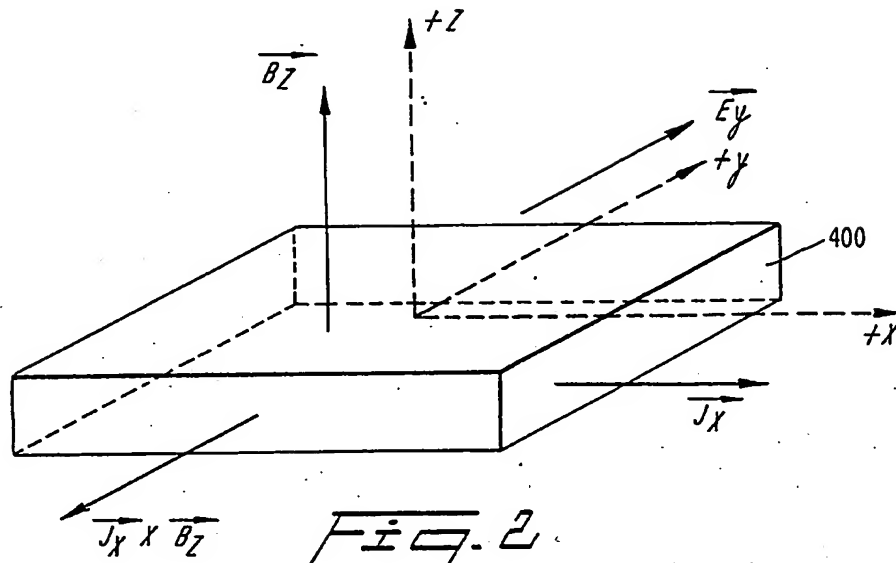
12. Meßsonde nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßsonde Steuermittel, insbesondere eine Steuerung bzw. Steuervorrichtung, aufweist, wobei der Permanentmagnet, das Hall-Effekt-Magnet-sens rmittel, die Wirbelstr mmeßspule (60) und das Temperatursensormittel, insbesondere der Thermistor, mit der Steuerung verbunden sind.

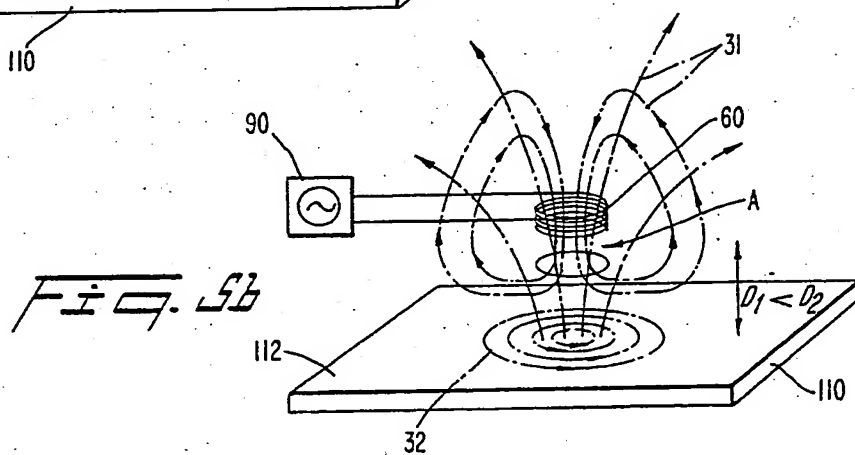
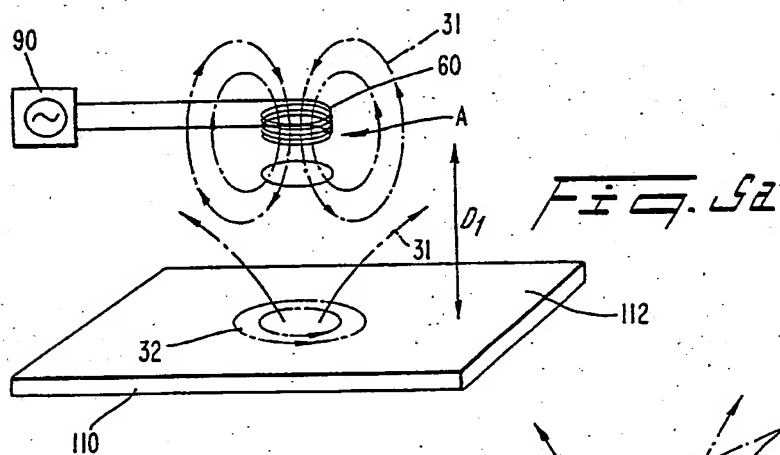
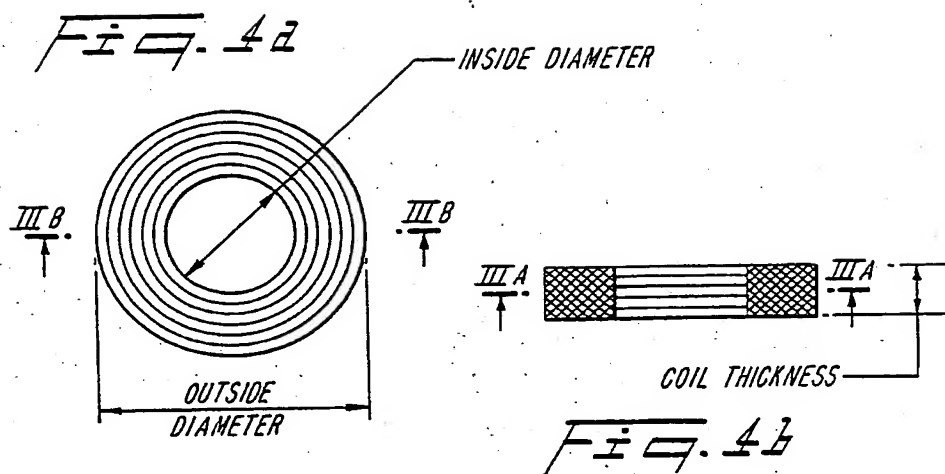
13. Meßsonde nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßsonde ferner Anzeigemittel, insbesondere ein Anzeigegerät, aufweist, die mit den Steuermittel verbunden sind, wobei die Anzeigemittel, die Schichtdickenmessung auf dem charakterisierten Substrat anzeigen.

14. Meßsonde nach einem der Ansprüche 11—13, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßsonde ferner Anwender-Schnittstellenmittel, insbesondere eine Anwender-Schnittstelle bzw. Interface, aufweist, die mit den Steuermittel verbunden sind, wobei die Anwender-Schnittstellenmittel eine Wechselwirkung zwischen einem Bediener und den Steuermittel erleichtern.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen







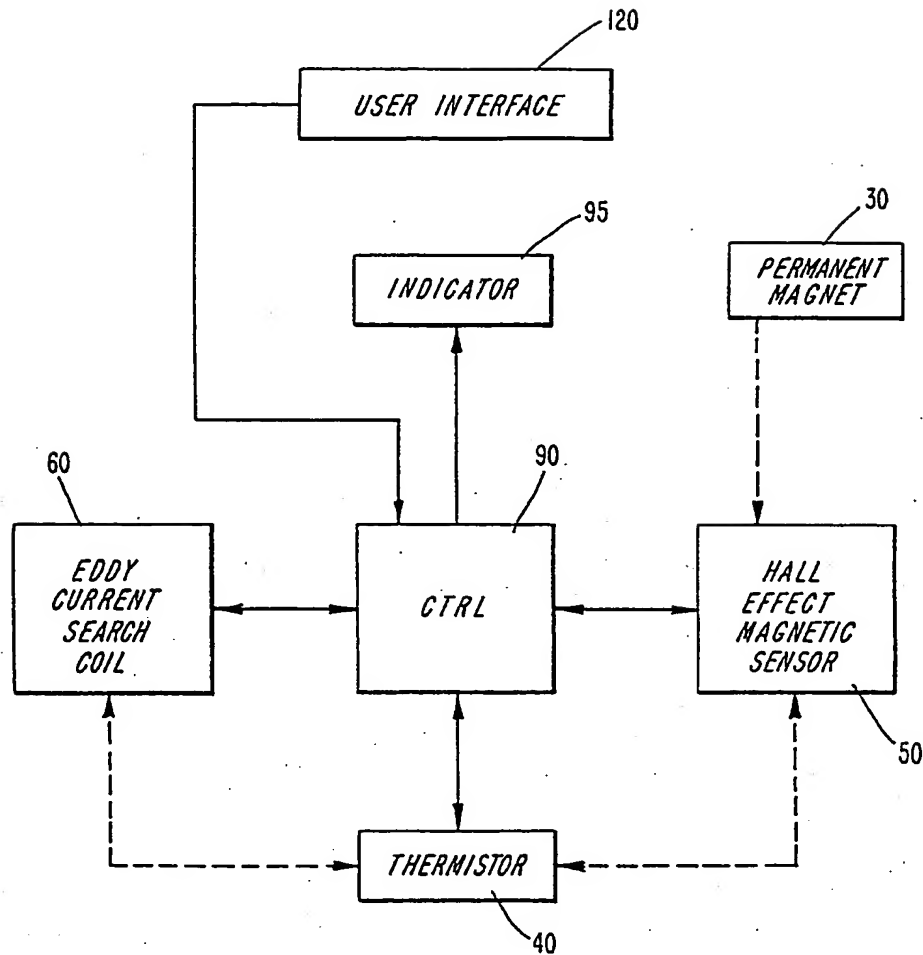
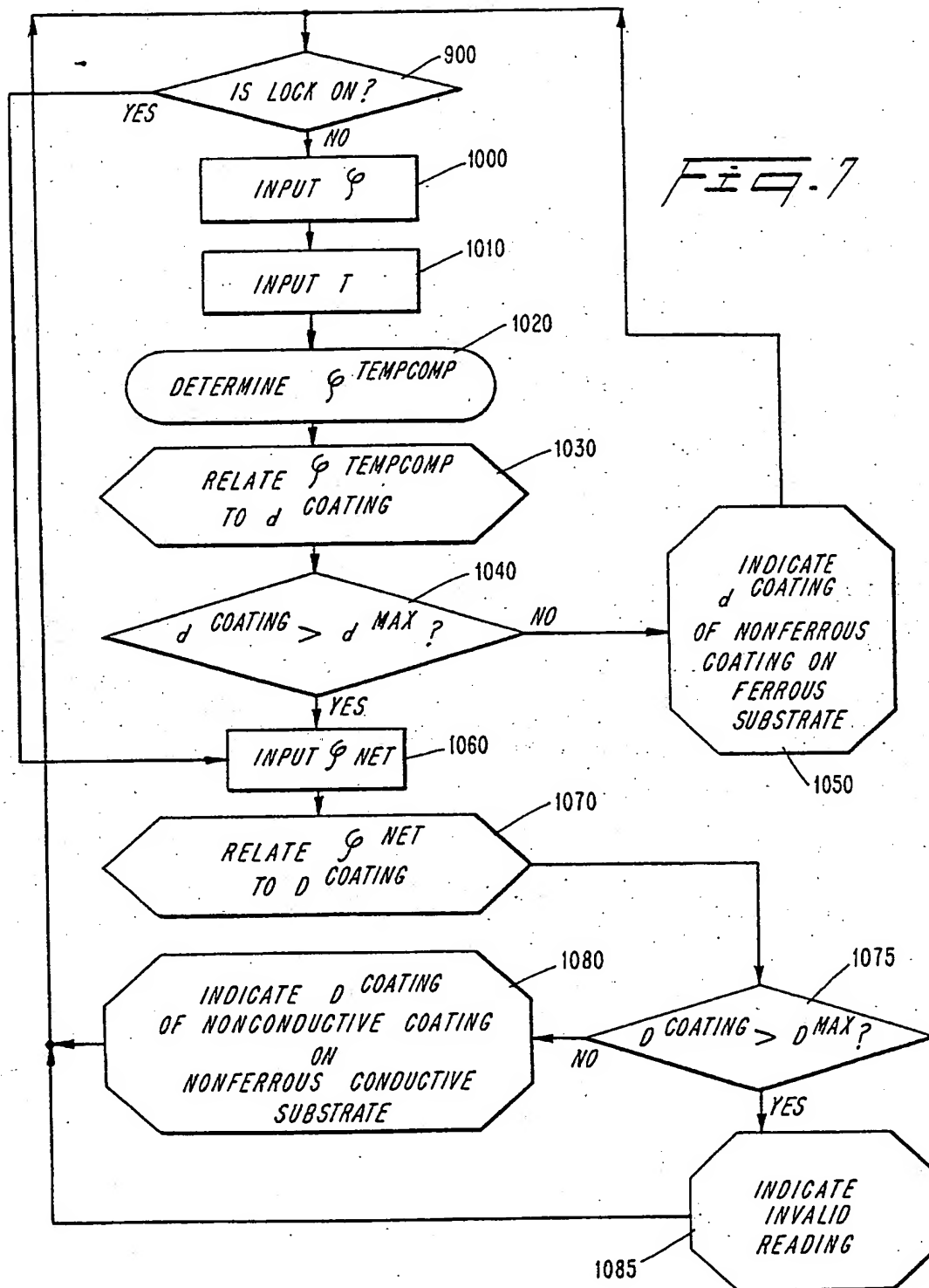


Fig. 6



Patent Number: US5343146

Publication date: 1994-08-30

Inventor(s): KOCH FRANK J (US); VANDERVALK LEON C (US); BEAMISH DAVID J (US)

Applicant(s): FELSKO CORP DE (US)

Requested Patent: DE4333419

Application Number: US19920956280 19921005

Priority Number(s): US19920956280 19921005

IPC Classification: G01B7/10; G01R33/12; G01N27/72

EC Classification: G01B7/10C

Equivalents: GB2271641, JP2698749B2, JP6317401

A gauge probe for a handheld combination coating thickness gauge allows the combination coating thickness gauge to measure both nonferrous coatings on ferrous substrate and nonconductive coatings on conductive nonferrous substrate. The gauge probe enables the combination coating thickness gauge to determine automatically, with a single probe, the substrate characteristics, and to effect a measurement of the coating thickness on that substrate. The technique used to measure coatings on a ferrous substrate utilizes a permanent magnet to provide a constant magnetic flux and a Hall sensor and thermistor arranged to measure the temperature-compensated magnetic flux density at one of the poles of the permanent magnet. The flux density at the magnet pole can be related to a nonferrous coating thickness on a ferrous substrate. The technique used to measure nonconductive coatings on a conductive nonferrous substrate utilizes eddy current effects. A coil near the gauge probe tip is excited by an alternating current oscillating between about 6 MHz and about 12 MHz. The coil sets up eddy currents on the surface of the conducting substrate. The resulting eddy currents set up an opposing magnetic field which in turn have an effect on the excited coil. The eddy current effects on the coil are quantified, and the degree of the eddy current effects on the coil are related to the nonconductive coating thickness on a conductive substrate. The gauge probe detects the substrate type and automatically determines the coating thickness on the detected substrate.

Data supplied from the **esp@cenet** database - 12

TEL. (954) 375-1100
HOLLYWOOD, FLORIDA 33022
P.O. BOX 2440
LENNER AND ASSOCIATES, P.A.
APPLICANT: _____
SERIAL NO: _____
DOCKET NO: _____

THIS PAGE BLANK (USPTO)

DOCKET NO: TER-00P0016

SERIAL NO: _____

APPLICANT: A. Busch et al.

LERNER AND GREENBERG P.A.

P.O. BOX 2480

HOLLYWOOD, FLORIDA 33022

TEL. (954) 925-1100